

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКОГО ДОКУМЕНТА «АТЛАС АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ АЭС»

Антропов В.Н. – Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности (НТЦ ЯРБ)

Введение

В настоящее время в НТЦ ЯРБ осуществляется разработка методического документа (МД) «Атлас аварийных режимов АЭС». Необходимость такого документа в составе методических документов Госатомнадзора России определяется следующей причиной.

В ходе экспертизы обоснований безопасности энергоблоков АЭС во многих случаях требуется провести сравнение результатов расчетных анализов аварий, представленных Заявителем, с результатами независимых расчетов тех же или аналогичных аварийных режимов. Причем, как правило, невозможно выполнять подобные расчеты непосредственно в процессе экспертизы, отвечая на возникающие в ходе экспертизы вопросы. Дело в том, что время, требуемое на выполнение одного расчетного анализа аварии (подготовка исходных данных, составление файла входных данных, выполнение расчетов, анализ и описание полученных результатов), обычно значительно превышает время, отведенное на экспертизу.

Ситуация упрощается тем, что имеются весьма схожие между собой энергоблоки АЭС, и для их лицензирования эксплуатирующие организации представляют похожие обосновывающие материалы. Кроме того, на некоторые энергоблоки подаются ежегодно заявки на выдачу годичной лицензии на эксплуатацию. Соответственно, даже независимые расчеты, выполненные после завершения экспертизы, оказываются полезными при проведении последующих экспертиз аналогичных энергоблоков АЭС и при повторной экспертизе данного энергоблока. Для облегчения использования таких заранее выполненных независимых расчетов их результаты должны быть систематически собраны в соответствующий справочный документ.

Исходя из вышеизложенного, было принято решение выполнять независимые расчетные анализы аварий систематически по отдельному плану параллельно с выполнением работ по экспертизе, а результаты расчетов представлять в виде разделов соответствующего МД.

Помимо собственных расчетных анализов в состав «Атласа...» предполагается включать расчетные анализы аварий выполненные в других организациях, не

участвовавших в разработке соответствующих разделов обоснований безопасности энергоблоков АЭС. Понятно, что это осуществимо только в тех случаях, когда исходные данные и результаты расчетов в достаточной степени доступны сотрудникам НТЦ ЯРБ для их оценки и применения.

Назначение, состав и содержание документа

Исходя из изложенного выше, назначение документа «Атлас аварийных режимов АС» можно определить как методическое обеспечение экспертизы анализов безопасности лицензируемых энергоблоков АС.

Из указанного назначения вытекает основное требование к содержанию документа. Оно должно отражать номенклатуру исходных событий проектных аварий, представленную в соответствующих нормативных документах Госатомнадзора России /1–3/. Для АЭС с реакторами типа ВВЭР наиболее систематически данная номенклатура представлена в /2/. Здесь выделены следующие группы исходных событий проектных аварий:

- Увеличение теплоотвода от первого контура.
- Уменьшение теплоотвода от первого контура.
- Уменьшение расхода теплоносителя.
- Изменение реактивности и распределения энерговыделения.
- Увеличение массы теплоносителя первого контура.
- Уменьшение, включая потерю, массы теплоносителя первого контура.
- Выброс радиоактивных сред из систем и оборудования.
- Потеря теплоносителя второго контура.
- Потеря источников энергоснабжения.
- Нарушения в транспортно-технологических операциях.
- Ложная работа систем.
- Другие аварии.

Для АЭС с реакторами типа РБМК аналогичный перечень групп исходных событий проектных аварий определен в /3/:

- Аварии с потерей теплоносителя.
- Реактивностные аварии.
- Нарушения охлаждения.
- Эксплуатационные переходные режимы.

– Другие аварии.

Оба приведенных перечня взяты за основу при формировании содержания глав «Атласа...», относящихся к соответствующим типам реакторов.

Из указанного выше назначения «Атласа...» следует также, что в его состав должны включаться результаты расчетов, выполненных в консервативном приближении. Учитывая, что для получения консервативных оценок различных характеристик аварийного переходного процесса (максимальное/минимальное давление, максимальная/минимальная температура и т.п.) требуются различные начальные и граничные условия расчета, в состав «Атласа...» могут быть включены несколько анализов аварии с одним и тем же исходным событием.

Длительность рассчитанных переходных процессов должна быть достаточна для определения упомянутых характеристик аварийного переходного процесса без необходимости экстраполяции полученных результатов расчета.

Подход к выбору сценариев анализируемых аварий

Чтобы выполняемые или применяемые расчетные анализы аварий отвечали на вопросы экспертизы, при определении последовательностей событий (сценариев) анализируемых аварий и методов их расчета должны учитываться замечания и проблемы безопасности, выявленные в ходе экспертизы аналогичных энергоблоков АЭС, уже прошедших процедуру лицензирования. Эти замечания и проблемы были обобщены и представлены в виде обзора /4/ в рамках данной работы. Там же приведен примерный перечень необходимых дополнительных или проверочных расчетов.

В качестве характерного примера реализации данного подхода можно привести мотивировку выбора последовательности событий аварии с отключением двух турбогенераторов при работе реактора РБМК на номинальной мощности. Эта авария входит в группу «Эксплуатационные переходные режимы» (см. выше).

Анализ данной аварии представлен в ТОО РУ энергоблока 3 Смоленской АЭС /5/. Согласно результатам анализа при такой аварии обеспечено надежное охлаждение активной зоны, а давление в КМПСЦ не выходит за допустимые пределы. Однако в ходе экспертизы, проводившейся в рамках процедуры лицензирования энергоблока, было выявлено, что анализ данной аварии выполнен с существенными отступлениями от требований нормативных документов. В частности, при выборе пути протекания аварии не был учтен независимый отказ элемента систем безопасности. Кроме того, в представленном описании результатов анализа не было указано, какие программы и методики были

использованы при выполнении расчета аварийного переходного процесса. Не было представлено информации о результатах верификации этих методик и программ. Следовательно, результаты анализа аварии с отключением двух турбогенераторов, представленные в ТООБ РУ энергоблока 3 Смоленской АЭС, не могут считаться приемлемыми и нуждаются в проверке путем выполнения независимого расчетного анализ этой аварии с соблюдением соответствующих требований нормативных документов и с использованием известных расчетных программ, применимость которых к моделированию протекающих процессов продемонстрирована в ходе их верификации.

Авария с отключением двух турбогенераторов была проанализирована в рамках данной работы применительно к энергоблоку 3 Смоленской АЭС. В настоящее время результаты анализа подготовлены для включения в «Атлас...». При этом выбор пути протекания анализируемой аварии осуществлялся исходя из следующих соображений с учетом выводов экспертизы.

Рассматриваемое исходное событие аварии приводит к росту давления в контуре многократной принудительной циркуляции (КМПЦ), поэтому основная задача данного анализа должна сводиться к оценке достаточности предусмотренных проектом систем безопасности (главных предохранительных клапанов) для выполнения функции безопасности (ФБ): защита КМПЦ от превышения давления.

Эффективность выполнения упомянутой ФБ в наибольшей степени чувствительна к отказам на открытие главных предохранительных клапанов (ГПК). Система ГПК состоит из 8 клапанов, объединенных в три группы по величине уставок на открытие/закрытие. При такой конфигурации системы ГПК наиболее консервативным является отказ одного ГПК первой группы (с наименьшими уставками на открытие), поэтому в данном анализе он постулируется в качестве независимого отказа элемента системы безопасности.

Предполагается, что до возникновения исходного события аварии реактор работал на полной мощности (3200 МВт). В этом случае имеет место максимальное возмущение параметров блока и, соответственно, максимальный выбег давления в КМПЦ.

Предполагается также, что электроснабжение переменным током основных потребителей собственных нужд (СН) сохраняется. Схема электроснабжения СН энергоблока предусматривает автоматическое беспереывное переключение электроснабжения от генераторов на внешнюю сеть. К основным потребителям СН относятся главные циркуляционные насосы (ГЦН) и питательные электроприводные насосы (ПЭН).

Последнее предположение обеспечивает консервативную оценку максимального давления в КМЩ, т. к. при сохранении в работе имеет место более интенсивный отвод тепла от активной зоны при сохранении подпитки КМЩ. Кроме того, наличие работающих ГЦН создает дополнительную нагрузку на элементы КМЩ, находящиеся на напорной стороне этих насосов.

При рассматриваемой аварии существенное влияние на выбег давления в КМЩ оказывают также и другие паросбросные устройства, имеющиеся на энергоблоке. К таким устройствам относятся быстродействующее редуцирующее устройство со сбросом пара в конденсатор турбины (БРУ-К) и в коллектор собственных нужд (БРУ-СН). Эти устройства отнесены к системам нормальной эксплуатации. Такие устройства проектируются и изготавливаются по общепромышленным правилам и нормам. В частности, при их проектировании не учитывается принцип единичного отказа. Поэтому, в отличие от систем безопасности, достаточный уровень надежности этих устройств не гарантирован, и при анализе безопасности должен предполагаться дополнительный отказ этих устройств на требование, если он приводит к усугублению ситуации.

Оба упомянутых устройства (БРУ-К, БРУ-СН) при работе энергоблока на номинальной мощности могут находиться в закрытом положении. Поэтому при выборе наиболее консервативного варианта пути протекания аварии правомерно предположить, что эти устройства останутся в закрытом положении в течение всего аварийного переходного процесса (отказ на требование).

Последнее предположение усиливается тем, что отказ БРУ-К может возникнуть и по общей причине, когда отключение турбогенераторов и запрет на работу БРУ-К обусловлены потерей вакуума в конденсаторе турбины.

Таким образом, наиболее консервативным вариантом пути протекания данной проектной аварии является отключение двух турбогенераторов (закрытие стопорно-регулирующих клапанов обеих турбин) при работе реактора на номинальной мощности с сохранением электропитания собственных нужд, неработоспособным состоянием БРУ-К и БРУ-СН в закрытом положении с наложением независимого отказа одного ГПК первой ступени.

Анализ, был выполнен с использованием расчетной программы (кода) ATHLET. Этот код, первоначально разработанный и верифицированный применительно к конструкциям западных легководных реакторов, в настоящее время адаптирован для расчетов теплогидравлических процессов в российских реакторных установках типа РБМК и находится в процессе верификации для данной области применения.

Результаты анализа (см. Приложение) показали, что выбег давления в КМПЦ, ожидаемый при данной проектной аварии не создает угрозы целостности оборудования реакторной установки. Однако имеется необходимость корректировки существующих характеристик ГПК с тем, чтобы в соответствии с требованиями нормативных документов /6/ эти элементы системы безопасности обеспечивали необходимое ограничение максимального давления в КМПЦ (115% рабочего давления) при проектных авариях без вспомогательной работы паросбросных устройств нормальной эксплуатации.

Полученные таким образом и представленные в «Атласе...» результаты анализа данной проектной аварии будут использованы при последующих экспертизах лицензируемых энергоблоков АЭС с реакторами типа РБМК.

Формат представления анализов аварий в документе

Для удобства последующего использования результаты расчетных анализов аварий, включаемые в «Атлас...», должны представляться в единообразном формате. Каждый из разделов «Атласа...» должен содержать краткое описание результатов анализа аварии для энергоблока АЭС с графическим представлением изменения определяющих параметров в анализируемом аварийном переходном процессе. Примером раздела «Атласа...» выполненного в таком формате применительно к теплогидравлическим процессам в реакторной установке типа РБМК может служить представленный в Приложении раздел, содержащий результаты упомянутого выше анализа проектной аварии с отключением двух турбогенераторов.

Состояние разработки документа

К настоящему времени разработан макет документа, в состав которого включены следующие результаты анализов проектных аварий:

- ◆ Энергоблоки АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000
 - Увеличение теплоотвода от первого контура
 - Разрывы паропроводов и питательных трубопроводов в различных местах и помещениях
 - * *Обрыв трубопровода питательной воды парогенератора*
 - Уменьшение теплоотвода от первого контура
 - Отключение питательных насосов
 - * *Отказ двух турбоприводных питательных насосов по общей причине*
 - Уменьшение, включая потерю, массы теплоносителя первого контура

- Разрывы трубопроводов, соединяющих оборудование первого контура
 - * Малая течь (60т/час) из холодной полупетли реакторного контура

◆ Энергоблоки АЭС с реакторами типа ВВЭР-440

- Изменение реактивности и распределения энерговыделения
 - Неконтролируемое извлечение органа регулирования с рабочей скоростью:
 - * *на минимально контролируемом уровне мощности*
 - * *на номинальном уровне мощности*
 - Выброс органа регулирования
 - * *Выброс регулирующей кассеты на номинальной мощности*
 - Неправильное действие с регулирующими органами
 - * *Сброс регулирующей кассеты на номинальной мощности*
 - Подключение нефункционирующей петли реакторного контура
 - * *Запуск остановленного ГЦН*
 - Неисправности в системе регулирования концентрации растворенного поглотителя
 - * *Неисправности в системе подпитки реакторного контура и борного регулирования*

◆ Энергоблоки АЭС с реакторами типа РБМК-1000

- Аварии с потерей теплоносителя
 - *Разрыв полным сечением опускного трубопровода сепаратора*
- Эксплуатационные переходные режимы
 - Отключение турбин
 - * *Отключение двух турбогенераторов при работе реактора на номинальной мощности*

Продолжается работа по выполнению собственных расчетных анализов аварий и применению результатов анализов аварий, выполненных в рамках других работ. Выпуск следующей редакции МД предполагается осуществить в конце 2001 г.

Помимо этого представляется целесообразным наряду с «бумажным» документом «Атлас аварийных режимов АС» разработать и установить на сервере НТЦ ЯРБ электронную базу данных с результатами независимых расчетных анализов проектных аварий

Литература

1. Типовое содержание технического обоснования безопасности атомных станций (ТС ТОб АС-85), ПНАЭ Г-1-001-85.
2. Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности атомных станций с реакторами типа ВВЭР, ПНАЭ Г-01-036-95.
3. Рекомендации по углубленной оценке безопасности действующих энергоблоков атомных станций с реакторами типа ВВЭР и РБМК (ОУОБ АС), РБ Г-12-42-97.
4. Отчет о НИР. Обзор экспертных оценок и рекомендаций, сделанных в ходе изучения обоснований безопасности энергоблоков российских АЭС и разработка примерного перечня аварий, требующих проведения дополнительных или проверочных расчетов. НТЦ ЯРБ, Инв. № 120-19/362, 1999.
5. Техническое обоснование безопасности 3 блока Смоленской АЭС. Д040-119.
6. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок, ПН АЭ Г-7-008-89.

**Приложение. Пример представления результатов расчетного анализа
в «Атласе аварийных режимов АС»**

1	Исходное событие: Отключение двух турбогенераторов												
2	Опорный энергоблок: Энергоблок № 3 Смоленской АЭС												
3	Дополнительные отказы: <ul style="list-style-type: none"> • Отказ на требование открытия одного ГПК первой ступени • Запрет на работу БРУ-К • Отказ на требование открытия БРУ-СН 												
4	Цель анализа: Проверка достаточности пропускной способности ГПК.												
5	Тип аварии: Проектная												
6	Используемые компьютерные коды, версия, специальные модели: ATHLET Mod 1.2A												
7	Анализ выполнен: в НТЦ ЯРБ в 2000 году												
8	Документация: Отчет НТЦ ЯРБ, инв. № 120-19/372												
9	Результаты сравнения с приемочными критериями: <ul style="list-style-type: none"> • Выбег давления в КМПЦ, ожидаемый при данной проектной аварии не приводит к превышению давления, разрешенного для гидравлических испытаний оборудования КМПЦ (отсутствует угроза целостности оборудования реакторной установки). • Располагаемая пропускная способность ГПК недостаточна для того, чтобы в соответствии с требованиями нормативных документов эти элементы системы безопасности обеспечивали необходимое ограничение максимального давления в КМПЦ (115% рабочего давления) при проектных авариях без вспомогательной работы паросбросных устройств нормальной эксплуатации. 												
10	Наиболее важные начальные условия: <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 60%;">Мощность реактора -</td> <td style="text-align: right;">100% (3200 МВт),</td> </tr> <tr> <td>Давление в барабане-сепараторе -</td> <td style="text-align: right;">6,88 МПа</td> </tr> <tr> <td>Давление в напорном коллекторе -</td> <td style="text-align: right;">8,52 МПа</td> </tr> <tr> <td>Расход теплоносителя через реактор -</td> <td style="text-align: right;">10422 кг/с</td> </tr> <tr> <td>Температура на входе в активную зону -</td> <td style="text-align: right;">268,3 °С</td> </tr> <tr> <td>Температура на выходе из активной зоны -</td> <td style="text-align: right;">286,3 °С</td> </tr> </table>	Мощность реактора -	100% (3200 МВт),	Давление в барабане-сепараторе -	6,88 МПа	Давление в напорном коллекторе -	8,52 МПа	Расход теплоносителя через реактор -	10422 кг/с	Температура на входе в активную зону -	268,3 °С	Температура на выходе из активной зоны -	286,3 °С
Мощность реактора -	100% (3200 МВт),												
Давление в барабане-сепараторе -	6,88 МПа												
Давление в напорном коллекторе -	8,52 МПа												
Расход теплоносителя через реактор -	10422 кг/с												
Температура на входе в активную зону -	268,3 °С												
Температура на выходе из активной зоны -	286,3 °С												

11	<p>Наиболее важные граничные условия:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Сохраняется электропитание потребителей собственных нужд переменным током (ГЦН и ПЭН остаются в работе) • Регуляторы уровня и давления в барабане-сепараторе остаются в работе • Пропускная способность по пару одного ГПК- 97,2 кг/с • Давление открытия ГПК: <ul style="list-style-type: none"> * первой группы - 7,453 МПа * второй группы - 7,551 МПа * третьей группы - 7,649 МПа • Давление закрытия ГПК: <ul style="list-style-type: none"> * первой группы - 7,158 МПа * второй группы - 7,256 МПа * третьей группы - 7,354 МПа
12	<p>Наиболее важные события в ходе аварии:</p> <p>0,0 с - исходное событие (отключение двух турбогенераторов)</p> <p>0,4 с - закрытие стопорно-регулирующих клапанов (СРК) турбин</p> <p>0,7 с - все стержни СУЗ по факту закрытия СРК в режиме АЗ-1 вводятся в зону под собственным весом</p> <p>8,0 с - достигается максимальная температура оболочек ТВЭЛОВ (не выше 300 °С)</p> <p>20 с - достигается максимальное давление в барабане-сепараторе (8,23 МПа) и напорном коллекторе (9,83 МПа)</p> <p>114 с - достигается минимальное значение уровня в барабане-сепараторе</p> <p>1650 с - окончание расчета.</p>

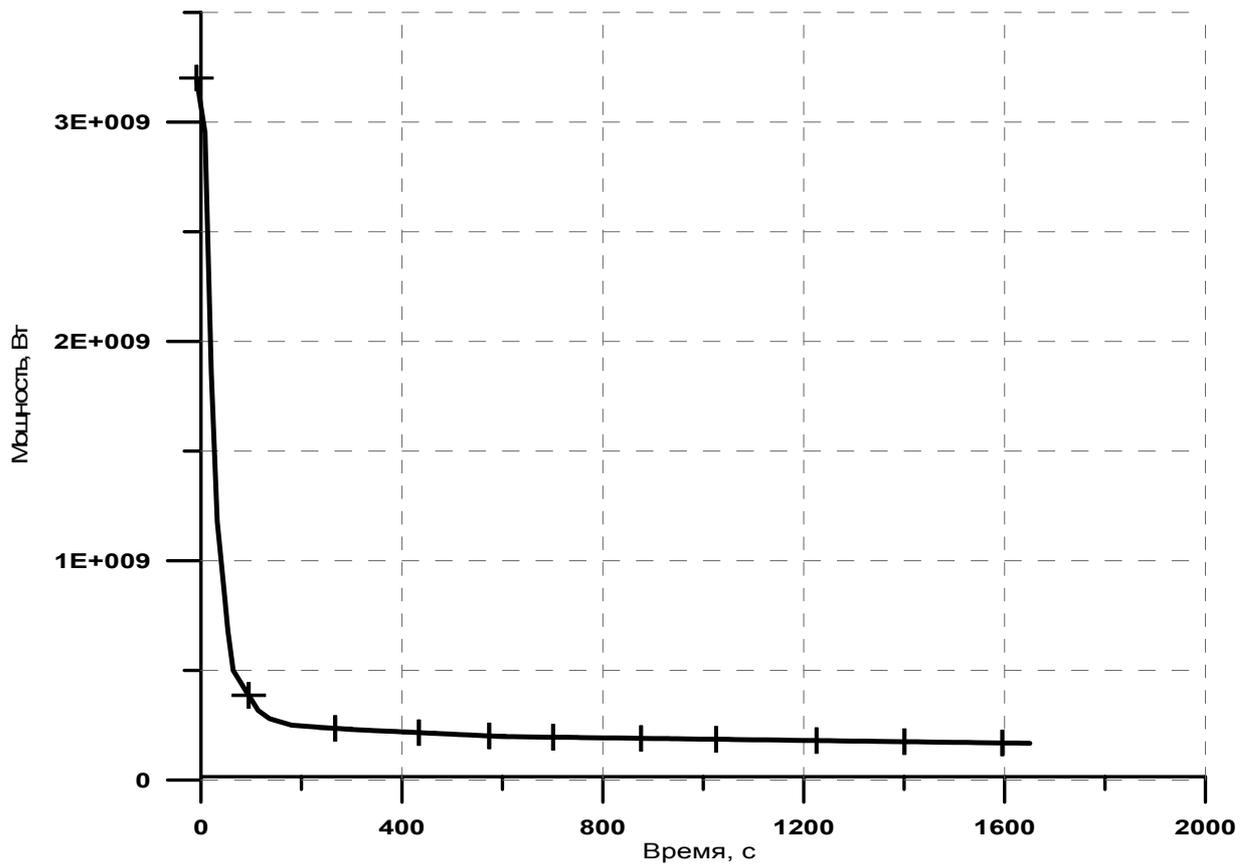


Рис. 1. Тепловая мощность реакторной установки

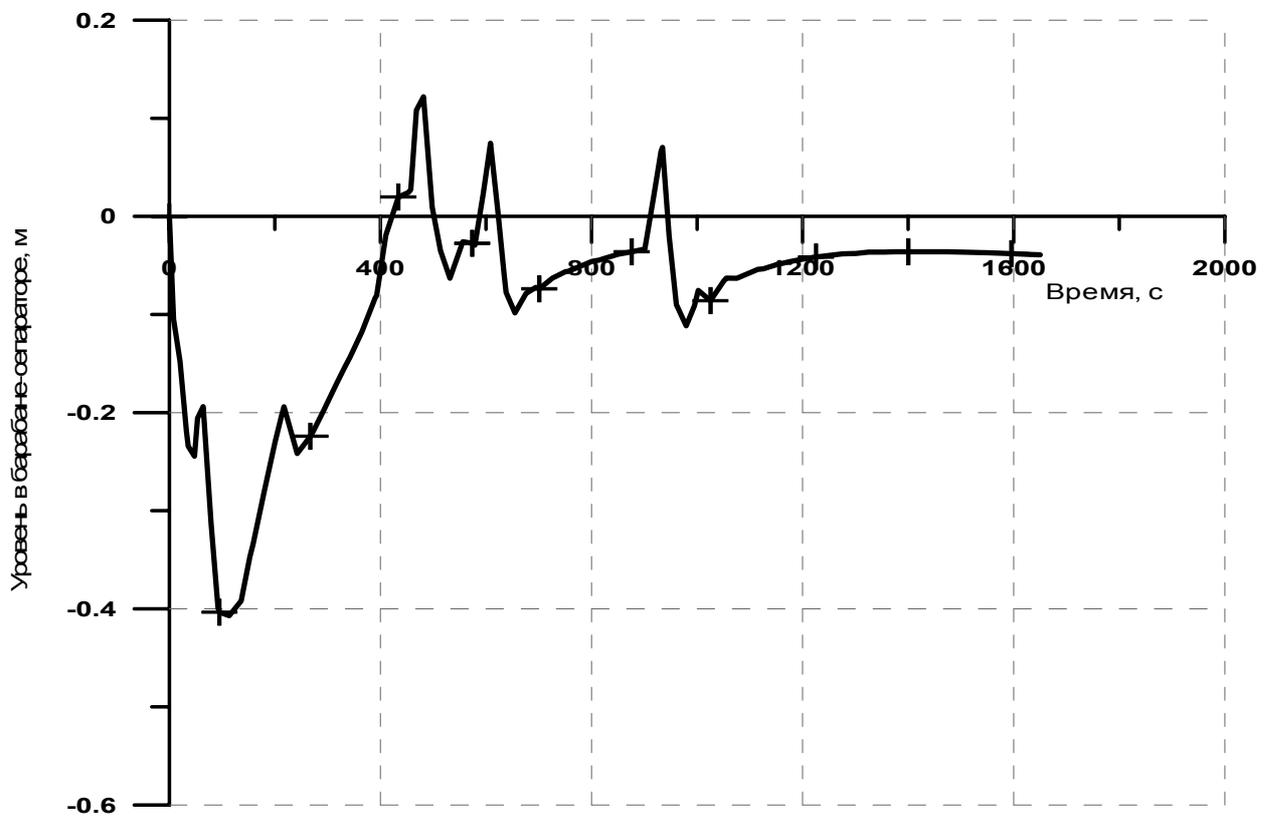


Рис. 2. Уровень в барабане-сепараторе

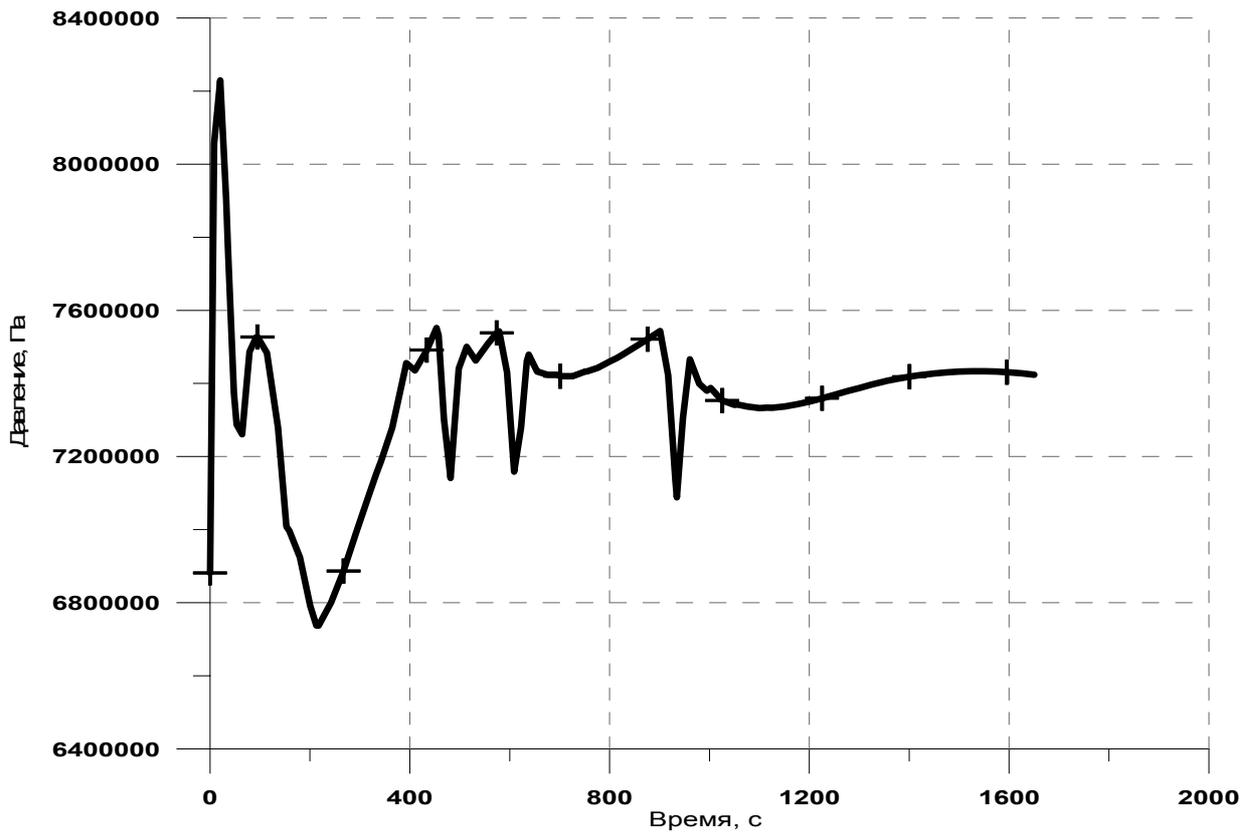


Рис. 3. Давление в барабане-сепараторе

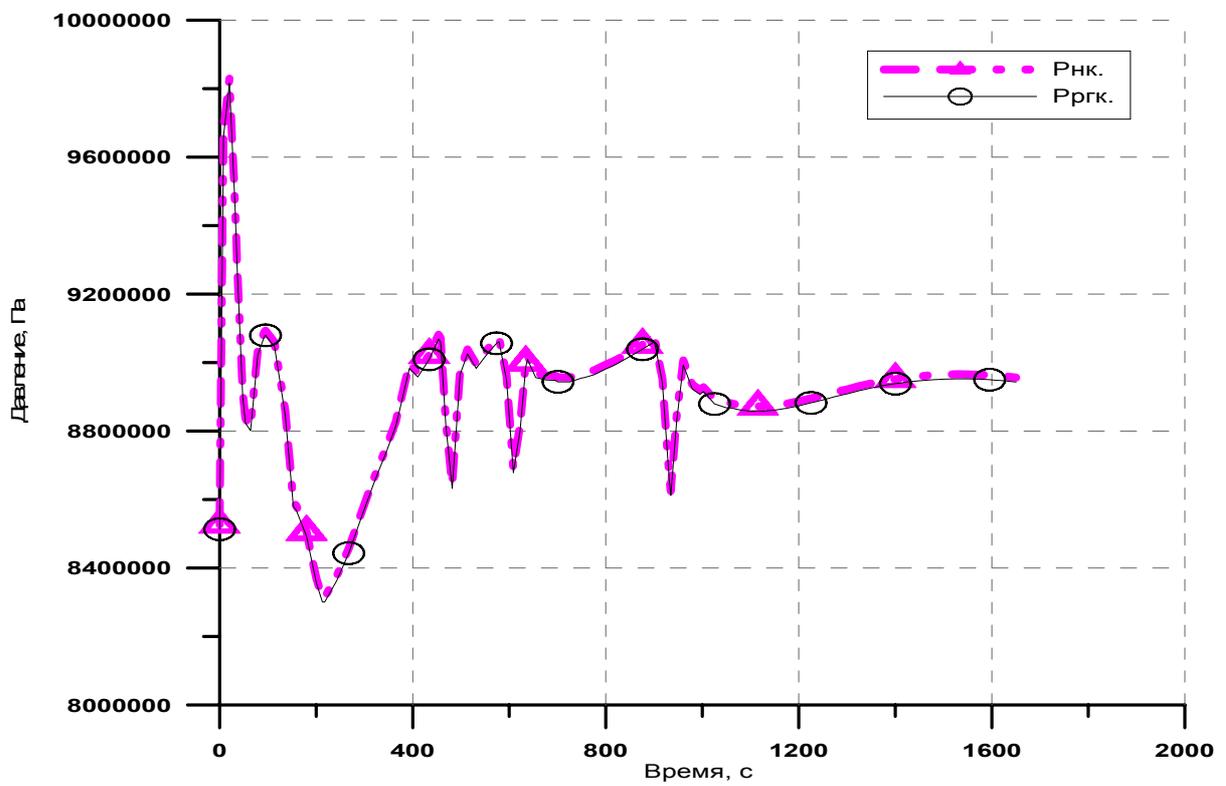


Рис. 4. Давление в НК и РГК

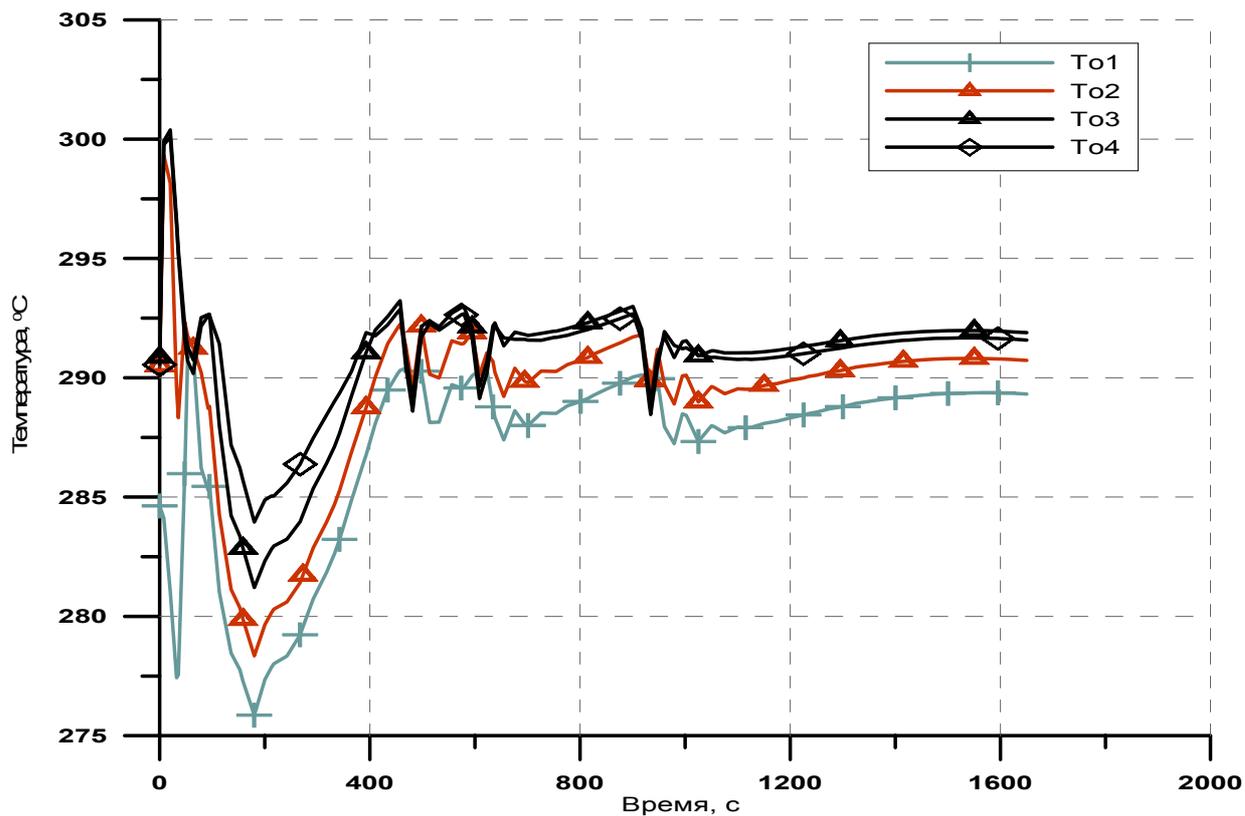


Рис. 5. Температура оболочки твэла по высоте топливного канала максимальной мощности

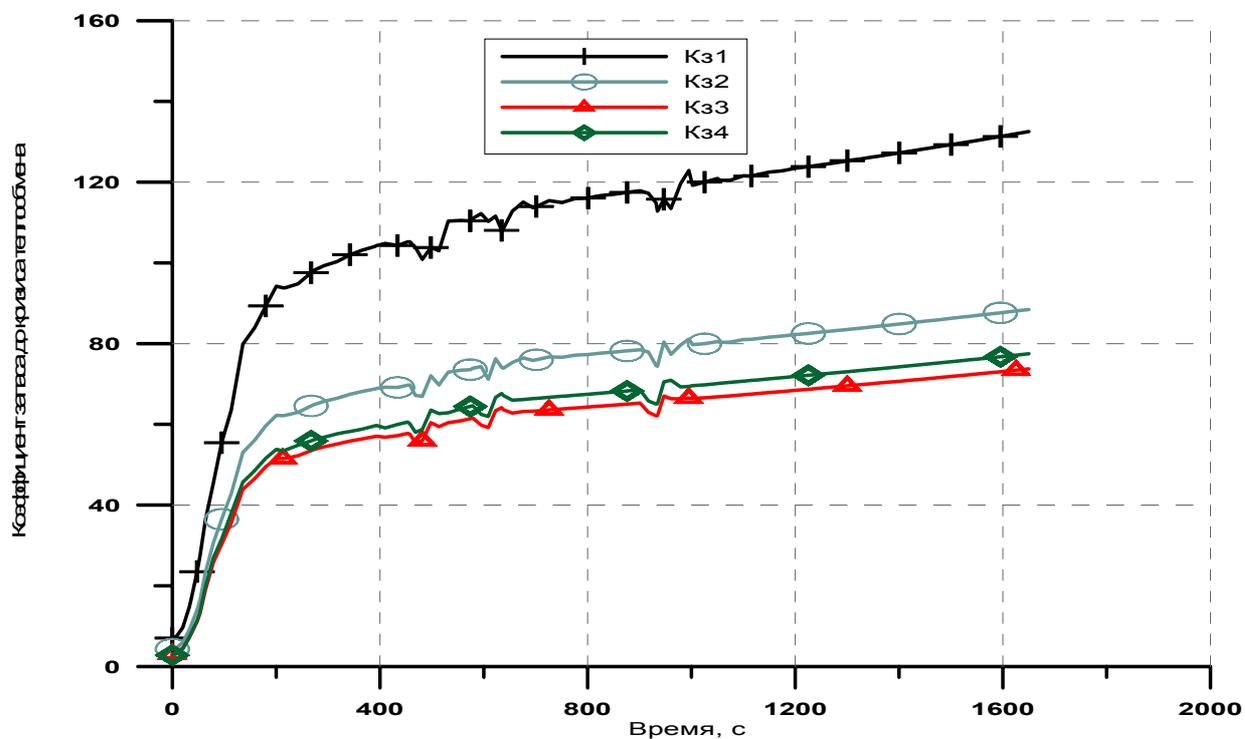


Рис. 6. Коэффициент запаса до кризиса теплообмена оболочки твэла по высоте топливного канала максимальной мощности